# بهبود عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های نوسانی با حرکت فراز و فرود در اعداد رینولدز پایین بااستفاده از انتقال حرارت*

احمد سمیعی [۱] محمدحسن جوارشکیان[۲] مجتبی هنرمند[۳]

**چکیده** *در این تحقیق، اثر انتقال حرارت برروی ضرایب برآ و پسای دو بالوارهٔ متقارن و انحنادار با حرکت نوسانی فراز و فرود در جریان لایه‌ای، به‌روش عددی بررسی شده‌است. معادلات ناویراستوکس قابل‌تراکم توسط یک روش عددی برمبنای حجم محدود گسسته و با الگوریتم پیمپل حل شده‌اند. در این شبیه‌سازی لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی سیال متغیر در نظر گرفته شده است و از تکنیک شبکه‌های دینامیکی استفاده گردیده‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، با کاهش دمای سطح بالواره‌ها نسبت‌به دمای جریان آزاد، نسبت برآ به پسا افزایش می‌یابد. همچنین اثر انتقال حرارت بر الگوی گردابه‌ها در لبهٔ انتهایی بالواره‌ها و درنتیجه تأثیر آن بر ضرایب آیرودینامیکی آنها بررسی شده‌است.*

.

**واژه‌های کلیدی** انتقال حرارت، حجم محدود، شبکهٔ دینامیکی، عدد رینولدز.

# Improvement of Aerodynamic Performance of Oscillating Airfoils with Plunging Motion at Low Reynolds Numbers Using Heat Transfer

A. Samiee M.H. Djavareshkian M. Honarmand

**Abstract** *In this study, the effect of heat transfers on lift and drag coefficients of two symmetric and camber airfoils with plunging motion in laminar flow is numerically investigated. The compressible Navier–Stokes equations are discretized using a finite volume method and they are solved by PIMPLE algorithm. In this simulation, fluid dynamic viscosity and thermal conductivity are considered to be variable. Also dynamic mesh method is used for oscillating motion. The results show that, by reducing the airfoil surface temperature less than the free flow temperature, lift to drag ratio increases. Moreover, influence of heat transfer on vortexes pattern at airfoils trailing edge and therefore its impact on the aerodynamic coefficients are investigated.*

**Key Words** Heat Transfer; Finite Volume; Dynamic Mesh; Reynolds number.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۲۱ و تاریخ پذیرش آن ۹٦/٤/١٤ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.58136

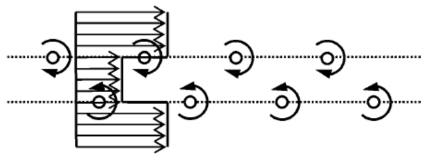
(۱) کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، گروه مهندسی مکانیک دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. javareshkian@um.ac.ir

(۳) کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

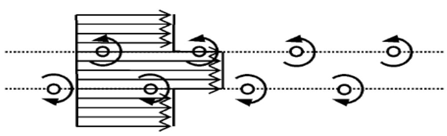
**مقدمه**

بـالواره‌هـای نوسـانی در تعـدادی از وسـایل ماننـد توربین‌های باد عمود محور، وسایل هـوایی ریـز پرنـده (MAV) استفاده می‌شوند. ارتقای هـر چـه بیشـتر ایـن وسایل یکی از زمینه‌های تحقیقاتی روز می‌باشـد. نـوع نیروی تولیدشده به‌وسـیلهٔ حرکـت‌هـای نوسـانی یـک جسم بستگی به ساختار گردابه‌های پشـت جسـم دارد. وون‌کارمن و برگز [1] در سال ۱۹۳۵ اشاره می‌کنند کـه اگر گردابه‌های پشت جسم در ردیف بـالا سـاعتگرد و در ردیف پایین پادسـاعتگرد بچرخنـد، کمبـود مـومنتم (پروفیـل سـرعت متوسـط در شـکل (۱) نشـان داده شـده‌اسـت) در دنبالـه (wake) درمقایسـه بـا جریـان بالادست منجر به تولید نیروی پسا مـی‌شـود و در ایـن حالت دنبالهٔ پشـت جسـم بـه دنبالـهٔ تولیـدکننـدهٔ پسـا معروف است.

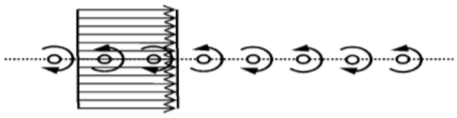


شکل ۱ ساختار گردابه‌های تولیدکنندهٔ نیروی پسا [2]

عکس آن، هنگامی است که گردابـه‌هـا در ردیـف بالا پادساعتگرد و در ردیف پایین ساعتگرد بچرخند که در آن صورت پروفیل سرعت متوسط نشان داده‌شده در شکل (۲)، مشابه پروفیل جت، حـاکی از آن اسـت کـه مومنتم دنباله بیشتر از جریان بالادست است کـه منجـر به تولید نیروی رانش می‌شود و سـاختار دنبالـهٔ پشـت جسم به دنبالهٔ تولیدکنندهٔ نیروی رانش معـروف اسـت. آنها اشاره می‌کنند که قـدرت ایـن نیـروهـا بـه فاصـلهٔ عمودی و افقی بین ردیف‌های گردابه‌هـا بسـتگی دارد. اگر فاصلهٔ عمودی بین ردیف‌هـا افـزایش یابـد، ناحیـهٔ سرعت متوسط کمتر (در حالت پسا) و یا ناحیهٔ سرعت متوسط بالاتر ( در حالت رانش ) افزایش مـی‌یابـد کـه خود منجر به افزایش نیـروی پسـا و یـا نیـروی رانـش می‌شود. کاهش این فاصـلهٔ عمـودی تـا نزدیـک صـفر باعث می‌شود که دو ردیف گردابـه‌هـا در یـک ردیـف قرار بگیرند و این حالت منجر به تولید پسا و یا رانـش صفر خواهد شد. دنبالهٔ پشت جسم در ایـن حالـت بـه دنبالــهٔ خنثــی (Neutral wake) معــروف اســت [2]. پروفیل سرعت متوسط در شکل (۳) برای حالت فـوق نشان داده شده‌است.

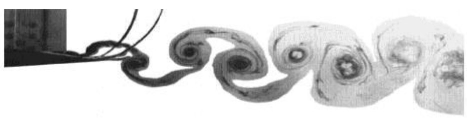


شکل ۲ ساختار گردابه‌های تولیدکنندهٔ نیروی رانش [2]



شکل ۳ ساختار گردابه‌های تولیدکنندهٔ نیروی رانش و یا پسا صفر [2]

لای و پلاتـزر [3] در سـال ۱۹۹۹ مشخصـه‌هـای دنبالهٔ یک بالوارهٔ نوسانی را به‌عنوان تابعی از فرکـانس، دامنه و سرعت جریان آزاد به‌صـورت تجربـی مطالعـه نمودند. همچنین آنها الگوی خاصی از دنباله را بـه‌ازای دامنه و فرکانس‌های خاص مشاهده کردند. بـرای مثـال شکل‌های (٤ و ٥) که نتایج کارهای آزمایشـگاهی آنهـا است، به‌ترتیب گردابه‌هـای از نـوع تولیدکننـدهٔ نیـروی رانش و خنثی می‌باشند.



شکل ٤ نتایج آزمایشگاهی لای و پلاتزر ، دنبالهٔ تولیدکنندهٔ رانش [3]



شکل ۵ نتایج آزمایشگاهی لای و پلاتزر، دنباله خنثی [3]

جونز، دورینگ و پلاتزر [4] در سال ۱۹۹۸ به‌طور آزمایشگاهی نشان دادند که گردابه‌های بالوارهٔ نوسانی با حرکت فراز و فرود بسته به فرکانس و دامنهٔ نوسان می‌تواند به هر سه شکل پسازا، رانشی و یا حتی خنثی در آید.

گوئررو [5] در سال ۲۰۰۹ اثر انحنا را روی عملکرد آیرودینامیکی یک بالوارهٔ نوسانی بررسی کرد و به این نتیجه رسید که انحنا تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای برروی ضریب برآ دارد ولی برروی ضریب رانش و بازده پیشرانش تأثیر کمی دارد. بر اساس این مشاهدات ادعا کرد که عمدتاً نیروی رانش وابسته به پارامترهای نوسانی است درحالی‌که برآ به پارامترهای هندسی وابسته است.

انگیزهٔ تلاش‌های تحقیق اخیر در آیرودینامیک اعداد رینولدز پایین به‌جهت اهمیت وسایل هوایی ریز پرنده می‌باشد. بالا بردن برآ، کاهش پسا و درنتیجه افزایش پوشش عملیاتی بالواره‌های این وسایل همواره مورد تحقیق پژوهشگران بوده‌است. روش‌های شناخته‌شدهٔ خوبی برای بهبود این مشخصات بالواره شامل بهینه‌سازی شکل بالواره، بالچه‌های لبهٔ حمله (Flaps) و فرار، وجود دارد. تأثیر پارامترهای مختلف مانند سینماتیک عملیاتی، بهینه‌سازی شکل بال و عدد رینولدز در تحقیق‌های متعددی موردمطالعه قرار گرفته‌است. ولی تاکنون توجه کمی به شرایط عملیاتی حرارتی خصوصاً برای حالت جریان ناپایا شده‌است. به هرحال، در تحقیق‌های پیشین اهمیت انتقال حرارت در جریان پایا بیان شده‌است. تعدادی از این بررسی‌ها روی پیش‌بینی مشخصات لایهٔ مرزی، پایداری و تأخیر گذار به‌وسیلهٔ گرمای سطح بالواره‌ها تحت شرایط حالت پایدار متمرکز شده‌اند. برای مثال نورتون [6] در سال ۱۹۷۳ یک بالوارهٔ گرم‌شدهٔ ناکا ۰۰۱۲ را در رینولدز $۱۰^۵$ با توزیع یکنواخت دما روی سرتاسر بالواره درنظر گرفت و اثرات دمای سطح را برروی لایهٔ مرزی و نیروهای آیرودینامیکی بررسی کرد. او پی برد که دمای سطح بالاتر از دمای جریان آزاد تمایل به بی‌ثبات‌کردن لایهٔ مرزی دارد که منجر به یک گذار و جدایش زودتر جریان می‌شود. همچنین پی برده شد که پسا با شار حرارتی افزایش می‌یابد. در چند تحقیق دیگر نیز ایدهٔ اساسی، افزایش پوشش عملیاتی بالواره‌ها بوده‌است. برای مثال کیم و همکارانش [7] در سال ۲۰۰۳ و بکا و همکارانش [8] در سال ۲۰۰۹، امکان بهبود بازده آیرودینامیکی توسط انتقال حرارت را در بالواره‌های مقیاس‌کوچک بررسی کردند. کیم و همکاران نشان دادند انتقال حرارت مناسب برروی بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ می‌تواند باعث بیشتر شدن زاویهٔ واماندگی بالواره شود. بکا و همکاران نیز اثرات حرارتی را روی آیرودینامیک پایای یک ریزپرنده بااستفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی بررسی کرد. او اشاره کرد که با وجود جریان غالباً آرام، معرفی مدل آشفتگی می‌تواند محاسبات عددی را پایدارتر و به مقادیر تجربی نزدیک‌تر کند.

آن‌چه در اینجا اهمیت دارد این است که این تحقیق‌ها اثر انتقال حرارت را برای بالواره‌ها در جریان پایا که درمورد بال‌های ثابت هستند، بحث کرده‌اند؛ اما آیرودینامیک بالواره‌ها، خصوصاً هنگام مطالعهٔ حرکت‌های نوسانی مهم به‌نظر می‌رسد. دنیس اف هینز و همکارانش [9] در سال ۲۰۱۳ از قضاوت نتایج برروی بالواره‌ها در حالت پایا نتیجه گرفتند که ممکن است اثرات حرارتی برروی آیرودینامیک بالواره‌های نوسانی در جریان رینولدز پایین نیز مهم باشد. آنها انتظار داشتند که گرمایش برروی لزجت و درنتیجه نیروهای اصطکاکی در لایهٔ مرزی آرام اثر بگذارد. آنها اثر انتقال حرارت را برروی عملکرد آیرودینامیکی حالت ایستا (Static) در رینولدز ۳۰۰۰، فراز و فرود در رینولدز ۲۰۰۰۰ و پیچ یک بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۳۰۰۰ بررسی کردند. در حالت ایستا با افزایش دما از ۳۰۰ به ۴۰۰ کلوین در سرتاسر بالواره نسبت‌به

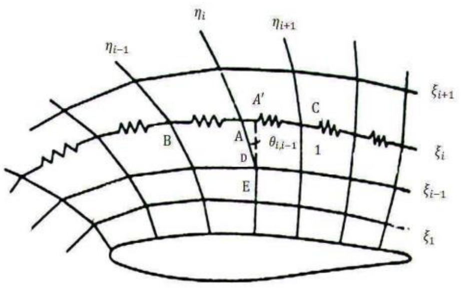
دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط تا ۶/۷ درصد افزایش یافت. درمورد حرکت فراز و فرود، مقدار متوسط ضریب پسا با افزایش اختلاف دمای سطح و جریان آزاد میل به افزایش نشان داد. درمورد حرکت پیچ، مقدار متوسط و دامنهٔ ضریب پسا و برآ با افزایش اختلاف دمای سطح و جریان آزاد کاهش یافت؛ بنابراین درمورد بررسی آنها هیچ بهبودی در عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های مطرح‌شده، به‌وجود نیامد. قابل توجه است که درمورد حرکت پیچ بررسی‌شده توسط آنها ضریب پسا با افزایش دما کاهش یافت اما در همان زمان ضریب برآ کاهش بیشتری را نشان داد که منجر به کاهش نسبت برآ به پسا شد.

بررسی تحقیق‌های پیشین نشان می‌دهد تأثیر پدیدهٔ انتقال حرارت برروی عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های ساکن بسیار مهم بوده‌است. به‌نظر می‌رسد این پدیده برروی بالواره‌های نوسانی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد، با وجود این در تحقیق‌ها به این نکته کمتر پرداخته شده‌است. در تنها مقالهٔ ذکرشده توسط دنیس اف هینز و همکارانش [9] در سال ۲۰۱۳ اثر گرمایش سطح بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در حرکت‌های نوسانی مطرح شده‌است. هدف از تحقیق اخیر، بررسی اثر انتقال حرارت برروی عملکرد آیرودینامیکی بالواره‌های نوسانی با حرکت فراز و فرود در رژیم جریان اعداد رینولدز پایین با تکیهٔ خاص بر ضرایب برآ و پسای بالواره‌ها می‌باشد. در این تحقیق بالواره‌ها هم در حالت گرمایشی و هم در حالت سرمایشی مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا بهبودی برای عملکرد آیرودینامیکی آنها حاصل شود. همچنین در مواردی گردابه‌های لبهٔ فرار در حالت‌های مختلف حرارتی تحلیل می‌شوند. اثر توأمان ضخامت و همچنین انحنا نیز در حضور انتقال حرارت موردبحث قرار می‌گیرد. معادلات ناویراستوکس نوسانی تراکم‌پذیر توسط یک روش عددی برمبنای حجم محدود و الگوریتم پیمپل تراکم‌پذیر با شبیه‌سازی عددی توسط شبکهٔ دینامیکی و استفاده از نرم‌افزار متن باز اپن فم (Open Foam) [10,11] حل می‌شوند. با درنظر گرفتن تغییر مشخصات سیال با دما، مقدار ویسکوزیتهٔ دینامیکی و ضریب نفوذ حرارتی به‌ترتیب با فرمول ساترلند (Sutherland) و اوکن (Eucken) ارزیابی می‌شوند.

## شبکه‌های دینامیکی و معادلات حاکم

شبکه‌های دینامیکی در مسائلی که هندسه تغییر می‌کند و یا جسم حرکت می‌کند مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع شبکه‌بندی، شبکه در هر لحظه با حرکت بالواره اصلاح می‌شود. شبکه‌های دینامیکی علاوه‌بر کارایی و کارامدی در دقت روش‌های عددی، حافظهٔ کامپیوتر و زمان حل برنامه (نسبت‌به تولید مجدد شبکه) را نیز کاهش می‌دهند. در شبکه‌های دینامیکی به‌منظور مدل‌کردن تغییر حرکت‌ها در مرز از تکنیک فنرهای خطی کششی [12] و خمشی [13] استفاده می‌شود. دراین روش که متداول‌ترین روش حرکت دادن شبکه المانی می‌باشد، هر کدام از اضلاع بین دو گره در شبکه به‌صورت موهومی به فنری با سفتی متناسب با عکس فاصلهٔ بین هر گره تبدیل می‌شود، به‌طوری‌که خطوط با طول بیشتر، دارای سفتی کمتر و خطوط با طول کمتر، سفتی بیشتر خواهند داشت. در کار حاضر برای شبیه‌سازی حرکت نوسانی بالواره از این تکنیک استفاده شده‌است [14].

درادامه روابط مربوط به فنرهای خطی و شبکه‌های دینامیکی از مرجع [15] آورده شده‌است. در شکل (۶) نمونه‌ای از شبکهٔ فنری نشان داده شده‌است.




شکل ۶ نمونه‌ای از شبکهٔ محاسباتی با فنرهای خطی

در شکل (٦)، نحوهٔ فنرزنی و ایجاد شبکه بااستفاده از روش فنر خطی قابل‌مشاهده است. بردار $\overrightarrow{e_{ij}}$ که گره i را به گره j وصل می‌کند به‌وسیلهٔ رابطهٔ (١) بیان می‌شود:

$$\overrightarrow{e_{ij}} = x_j - x_i \tag{١}$$

که طول این بردار برابر است با:

$$L_{ij} = \sqrt{e_{ij}.\, e_{ij}} \tag{٢}$$

$$i_{ij} = \frac{e_{ij}}{L_{ij}} \tag{٣}$$

$$\Delta = \left(m_j - m_i\right).\overrightarrow{\iota_{ij}} \tag{٤}$$

که در معادلهٔ (٤)، $\Delta$ تغییر مکان گره‌های i و j (${m_j}$و${m_i}$) درراستای بردار اتصال دو نقطه را نشان می‌دهد. به‌علاوه می‌توان سفتی فنر خطی برای هر ضلع را از رابطهٔ (٥) به‌دست آورد. درنتیجه نیروی ایجادشده روی گره i ام درراستای بردار یکهٔ $i_{ij}$ اعمال می‌شود که به‌صورت رابطهٔ (٦) می‌باشد. $k_{ij}$ سفتی فنری است که بین دو گره i و j قرار دارد و متناسب با عکس بردار ضلع می‌باشد.

$$k_{ij} = \frac{1}{L_{ij}} \tag{٥}$$

$$f_{ij}^{\text{edge}} = k_{ij}\left(m_j - m_i\right)\overrightarrow{\iota_{ij}}.\overrightarrow{\iota_{ij}} = -f_{ji}^{\text{edge}} \tag{٦}$$

بااستفاده از این روش سودمند می توان تغییر شکل‌های محلی المان را کنترل کرد. اگر طول المانی زیاد شد، سفتی آن زیاد می‌شودکه منجر به اعمال نیروی بیشتری به این المان می‌گردد و باعث جمع‌شدن آن می‌شود. این امر کمک زیادی به تطبیق‌دادن شبکه می‌کند. دو عدد از اعداد بی‌بعد حاکم بر جریان، فرکانس کاهیده K و دامنهٔ نوسان بی‌بعد H می‌باشد که به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mathrm{K} = \frac{\pi * \mathrm{f} * \mathrm{c}}{\mathrm{U}_\infty} = \frac{\omega * \mathrm{c}}{\mathrm{U}_\infty} \tag{٧}$$

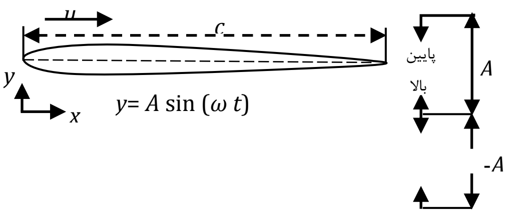
$$\mathrm{H} = \frac{A}{c} \tag{٨}$$

با قرار دادن سرعت جریان آزاد در رابطهٔ (٧) و فرض معلوم بودن فرکانس کاهیده می‌توان سرعت زاویه‌ای نوسان $\omega$ را محاسبه نمود. با داشتن سرعت فوق و دامنهٔ نوسان و قرار دادن آنها در رابطهٔ (٩)، معادلهٔ حرکت به‌دست می‌آید که این معادله به بال و ناحیهٔ متحرک اطراف آن اعمال می‌شود.

$$y(t) = A\ \sin(\omega * t) \tag{٩}$$

$$\mathrm{Y}(\tau) = \mathrm{H}\sin(2\mathrm{k}\tau) \tag{١٠}$$

رابطهٔ (١٠)، معادلهٔ حرکت بی‌بعد است که در آن $\tau = \frac{tU_\infty}{c}$ زمان بی‌بعد می‌باشد. شکل (٧)، شماتیک حرکت فراز و فرود خالص را نشان می‌دهد که در آن $c$ طول وتر بالواره می‌باشد.




شکل ٧  شماتیک حرکت فراز و فرود خالص

با معلوم بودن معادلهٔ حرکت، به‌منظور شبیه‌سازی عددی باید معادلات حاکم بر جریان حل شوند. معادلات حاکم بر جریان بیان‌کنندهٔ قوانین بقای جرم، حرکت و انرژی می‌باشند. روش استخراج این معادلات در منابع گوناگون مطرح شده‌است [16,17]. برای تحقیق اخیر میدان جریان در اطراف بالواره توسط معادلهٔ پیوستگی، معادلات ناویراستوکس تراکم‌پذیر و معادلهٔ انرژی حل شده‌است. معادلات (١٣-١١)

به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ معادلات فوق می‌باشند [9].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_\mathrm{i}) + \frac{\partial}{\partial x_\mathrm{j}}(\rho u_j u_\mathrm{i}) = \frac{\partial \tau_\mathrm{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_\mathrm{i}} \quad (۱۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_\mathrm{i}) + \frac{\partial}{\partial x_\mathrm{j}}(\rho u_j u_\mathrm{i}) = \frac{\partial \tau_\mathrm{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_\mathrm{i}} \quad (۱۲)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_\mathrm{j}}(\rho u_\mathrm{j} h) = \frac{\partial}{\partial x_\mathrm{j}}\left(\frac{k_T}{C_p}\frac{\partial h}{\partial x_\mathrm{j}}\right) + \frac{Dp}{Dt} \quad (۱۳)$$

کـه در آنهـا i=1,2 بـه‌ترتیـب بیـانگر مختصـات x و y هستند و $u_\mathrm{i}$ سرعت در جهت i است. $k_T$ و $C_p$ به‌ترتیب ضریب هدایت حرارتی و گرمای مخصوص می‌باشـند. انتالپی برابر $h = e + \frac{p}{\rho}$ [18] است که در آن $e$ ، $p$ و $\rho$ به‌ترتیب بیان‌کنندهٔ انرژی درونی، فشار و چگالی اسـت. $\frac{Dp}{Dt}$ در معادلهٔ انرژی مشتق کل(Total derivate) فشـار است و کار انجام‌شده به‌وسیلهٔ فشار را محاسبه می‌کنـد. انرژی جنبشی تبدیل‌شده به حرارت توسط اتلاف لـزج درمقایسه با ترم‌های دیگـر در معادلـهٔ انـرژی کوچـک اسـت و از آن صـرف‌نظـر شـده‌اسـت. سـیال نیـوتنی فرض‌شده و بخش لـزج تانسـور تـنش $\tau_\mathrm{ij}$ بـرای یـک سیال نیوتنی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [9]:

$$\tau_\mathrm{ij} = \mu\,(\frac{\partial u_\mathrm{i}}{\partial x_\mathrm{j}} + \frac{\partial u_\mathrm{i}}{\partial x_\mathrm{i}} - \frac{2}{3}\delta_\mathrm{ij} div \quad u^{\rightarrow}) \quad (۱٤)$$

که $\mu$ ویسـکوزیتهٔ دینـامیکی سـیال و $\delta$ نمـاد کرونکـر (Kronecker) است. جریان کاملاً آرام فرض شـده و از نیروی گرانش چشم‌پوشی شده‌است. به‌هرحال با درنظر گرفتن اختلاف دما بـین سـطح و جریـان آزاد، ممکـن است نیروهای گرانش بر جریان اثرگذار باشـد و منجـر به انتقال حرارت به‌صورت جابه‌جایی طبیعی شوند کـه در آن صورت مدل بالا برای حل مسئلهٔ حاضر مناسـب نخواهد بود. با فرض این‌که سـیال گـاز ایـده‌آل باشـد، انتالپی مخصوص با دما از طریق معادلهٔ حالت کالریـک (۱۵) مـرتبط خواهـد شـد [18]. متغیرهـای حالـت ترمودینامیکی $p$، $\rho$ و $T$ نیز از طریق معادلهٔ گاز ایـده‌آل مرتبط شده‌اند [18].

$$h = c_p T \quad (۱۵)$$

$$p = \rho R T \quad (۱٦)$$

که $R$ و $T$ به‌ترتیب ثابت گاز و دما می‌باشند.

## ویژگی‌های سیال

ویژگی‌های سیال عموماً بـا تغییـر دمـا ثابـت نیسـتند. مطالعــهٔ مشخصــات ســیال در دماهــای مختلــف در مرجع‌های گوناگون ذکر شده‌است [18]. با فـرض یـک تغییر حالت هم‌فشار، چگالی هوا با افزایش دما کـاهش می‌یابد. عدد پرانتل $\mathrm{Pr} = \frac{\mu c_p}{K_T}$ [18] نیـز کمـی کـاهش می‌یابـد. گرمـای مخصـوص $c_p$ تقریبـاً ثابـت مانـده و لزجـت دینـامیکی $\mu$ و ضـریب هـدایت حرارتـی $k_T$ افزایش می‌یابد.

لزجـت سـینماتیکی و دینـامیکی از طریـق رابطـهٔ $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ [18] مرتبط می‌شوند. هنگامی‌که چگالی کاهش و لزجت دینامیکی افزایش می‌یابد، لزجـت سـینماتیکی نیز افزایش خواهد یافت. ارتباط بـین ضـریب هـدایت حرارتی $k_T$ و ضریب نفوذ حرارتـی $\alpha_T$ نیـز بـا رابطـهٔ $\alpha_T = \frac{k_T}{\rho c_p}$ [18] بیان می‌شود کـه همـان رفتـار لزجـت سینماتیکی سیال را نشان می‌دهد.

از ارزیابی مشخصات فیزیکـی هـوا نتیجـه گرفتـه می‌شود که تغییر ویژگی‌های سیال در دماهای گوناگون ذاتی است و بایـد در محاسـبات در مـدل شـبیه‌سـازی به‌کار برده شود. در تحقیق اخیر، مـدل‌هـای زیـر بـرای بیان این تغییرات استفاده شده‌است [18–20]:

$$C_p = const = C_p(300K) = 1007\, J/kgK \quad (۱۷)$$

$$\mu_T = \frac{A_s\sqrt{T}}{1+\frac{T_s}{T}} \quad (۱۸)$$

$$k_T(T) = \mu(T)C_{Eucken} \quad (۱۹)$$

گرمای مخصوص $c_p$ با دما تغییر کوچکی نشان می‌دهد، بنابراین ثابت فرض شده‌است. لزجت دینامیکی با مدل ساترلند (Sutherland) در معادلهٔ (۱۸) [19]، با ضرایب $A_s$ و $T_s$ که به‌ترتیب برای هوا برابر $(\frac{kg}{ms\sqrt{K}})$ ۶- ۱۰ × ۱/۴۷۹۲ و ۱۱۶ کلوین می‌باشند، ارزیابی شده‌است. مدل ساترلند یک مدل تجربی است که طبق آن لزجت دینامیکی تابعی از دما می‌باشد. این مدل توافق خوبی را با مشخصات فهرست‌شدهٔ هوا در مراجع گوناگون مانند اینکروپرا و دوئیت [18] نشان می‌دهد. ضریب هدایت حرارتی سیال با مدل اوکن (Eucken) [20] سنجیده شده‌است که ضریب هدایت حرارتی را توسط یک ثابت مشخص که ثابت اوکن نام دارد به لزجت دینامیکی ارتباط می‌دهد. $C_{\text{Eucken}}$ برای مولکول‌ها و ترکیبات گازی با بیش از یک اتم، برای مثال هوا، از طریق رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{\text{Eucken}} = c_v\,(1.32 + \frac{1.77\,R}{c_v}) \quad (۲۰)$$

که در آن $c_v$ گرمای مخصوص در حجم ثابت است که از طریق رابطهٔ $c_p = c_v + R$ [18] با $c_p$ و $R$ مرتبط می‌شود.

## گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان

معادلات اساسی که بقای جرم، مومنتم و انرژی را بیان می‌کند، در حالت برداری و مستقل از سیستم مختصات، به‌صورت زیر بیان می‌شوند [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla.\left(\rho\varphi(U-U_g)\right) = \nabla.(\Gamma\nabla\varphi) + S_\varphi \quad (۲۱)$$

که در آن $U_g$ سرعت شبکه می‌باشد و $\varphi$ می‌تواند هر متغیر مانند u، v و یا h باشد. معادلهٔ (۲۱) توسط روش حجم محدود گسسته می‌شود و توسط الگوریتم فشار مبنا حل می‌شود.

جمله‌های نفوذ در این مطالعه براساس یک طرح تفاضل مرکزی مرتبه‌دوم و جمله‌های جابه‌جایی بااستفاده از یک روش تفاضل بالادست مرتبه‌دوم محدود گسسته‌سازی شده‌اند. همچنین از روش کاملاً ضمنی اولر (Euler) به‌منظور گسسته‌سازی جملهٔ زمانی استفاده شده‌است. انتگرال‌گیری زمانی از ترم‌های جابه‌جایی و پخش، می‌تواند به‌روش ضمنی و صریح انجام شود که طرح ضمنی به‌دلیل شرط پایداری نسبت‌به طرح صریح برتری دارد.

در این تحقیق معادلات گسسته‌شدهٔ جریان بااستفاده از الگوریتم پیمپل (PIMPL) تراکم‌پذیر حل می‌شوند. روش پیمپل مخفف روش ضمنی فشار مبنا برای معادلات وابسته به فشار است که ترکیبی از الگوریتم سیمپل (SIMPLE) و پیزو (PISO) می‌باشد. الگوریتم پیمپل از الگوریتم سیمپل به‌عنوان حلقهٔ خارجی جدید در الگوریتم پیزو استفاده می‌کند. در این تحقیق تعداد حلقه‌های خارجی، یک، و تعداد حلقه‌های داخلی، سه، درنظر گرفته شده‌است که درواقع الگوریتم حل به الگوریتم پیزو با سه مرتبه تصحیح تبدیل می‌شود. به‌این‌منظور در نرم‌افزار اپن فم از حلگر رو پیمپل دایم فویم (Rho Pimple Dym Foam) برای شبیه‌سازی‌های تحقیق پیش‌رو استفاده شده‌است. در این تحقیق ضرایب پسا و برآ به‌ترتیب از روابط (۲۲ و ۲۳) به‌دست می‌آیند [17]:

$$C_d = \frac{D}{1/2(A_{ref}\rho_\infty U_\infty^2)} \quad (۲۲)$$

$$C_L = \frac{L}{1/2(A_{ref}\rho_\infty U_\infty^2)} \quad (۲۳)$$

ضریب برآ و ضریب پسای متوسط نیز از روابط

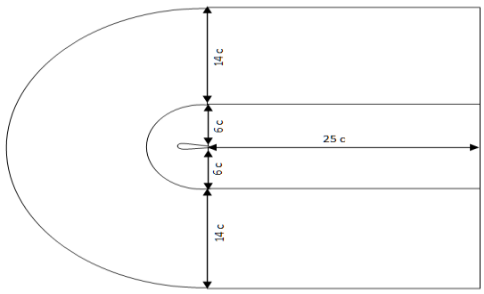
زیر محاسبه می‌شوند:

$$\overline{C_L} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} C_L\, dt \quad (۲۴)$$

$$\overline{C_d} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} C_d\, dt \quad (۲۵)$$

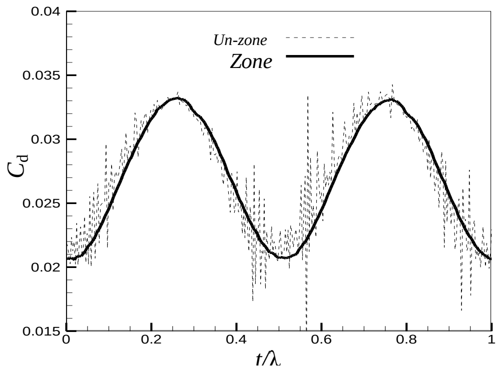
## شبکهٔ محاسباتی و دینامیکی

در تحقیق حاضر یک شبکه از نوع C برای مدل کردن جریان اطراف بالواره به‌کار برده شده‌است. انتخاب شبکهٔ نوع C نسبت‌به انواع دیگر مانند H و O به‌دلیل ساختار هماهنگ شبکه با بالواره، به‌کارگیری شبکهٔ لایهٔ مرزی و تولید سلول‌های مناسب در پشت بالواره بوده‌است. زیرا دیگر انواع شبکه، هنگام حرکت شبکه از کیفیت آنها کاسته می‌شد و نتایج خوبی را ارائه نمی‌دادند. طرح کلی شبکهٔ نوع C استفاده‌شده در پژوهش حاضر در شکل (۸) نشان داده شده‌است. ناحیهٔ محاسباتی درراستای عمود بر بالوارهٔ ۲۰ برابر وتر بالواره و در پشت بالواره ۲۵ برابر وتر، انتخاب شده‌است، تا اثرات ناشی از نوسان بالواره به مرزها نرسد. همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود، ناحیهٔ محاسباتی درراستای عمود بر بالواره به دو قسمت تقسیم شده‌است که قسمت نزدیک بالواره به‌همراه بالواره (قسمت داخلی) در قسمت دیگر (قسمت خارجی) نوسان می‌کند.



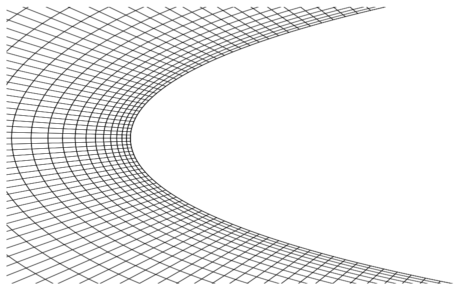

شکل ۸  شبکهٔ استفاده‌شده از نوع C در اطراف بالواره

علت این چیدمان شبکه، حفظ کیفیت شبکهٔ اطراف بالواره درحین حرکت نوسانی می‌باشد. به‌عبارت دیگر هنگامی‌که حرکت نوسانی به خود بالواره اعمال می‌شود، سلول‌های اطراف بالواره که بسیار ریز می‌باشند در حین نوسان در حالت نامناسبی قرار می‌گیرند و جواب‌های غیرقابل‌قبولی در روند حل مسئله ارائه می‌دهند و حتی امکان پاشش شبکه نیز وجود دارد. درصورتی‌که اگر بالواره خود به‌همراه یک ناحیهٔ مناسب (به‌اندازهٔ کافی دور از بالواره که سلول‌ها بزرگ شوند و درنتیجهٔ حرکت ناحیهٔ داخلی درون ناحیهٔ خارجی، شبکه با مشکلی روبه‌رو نشود) درون ناحیهٔ خارجی نوسان کند، سلول‌های اطراف بالواره هیچ تغییری نمی‌کنند و حل دچار خطا نخواهد شد. ضمن این‌که در این حالت امکان پاشش شبکه به کمترین مقدار خود خواهد رسید. خاطرنشان می‌شود که حفظ کیفیت شبکه و جلوگیری از پاشش شبکه، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در شبکه‌های دینامیکی می‌باشد. برای نیل بدین منظور در نرم‌افزار اپن فم از روش شبکهٔ حجم محدود متحرک جسم صلب (Solid Body Motion Fv Mesh) به‌همراه حرکت نوسانی خطی (Oscillating Linear Motion) استفاده شده‌است. برای بررسی دو روش شبکهٔ دینامیکی اشاره‌شده، شبیه‌سازی انجام شده‌است. شکل (۹) نمودار ضریب پسای بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰ و شرایط گرمایشی (دمای سطح بالواره ۴۰۰ و دمای جریان آزاد ۳۰۰ کلوین) را برای هنگامی‌که یک بار نوسان به بالواره و بار دیگر به ناحیهٔ اطراف آن، اعمال می‌گردد، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگامی‌که نوسان به بالواره اعمال شده‌است نوسانات زیادی در ضریب پسا به‌وجود آمده‌است. در این شکل $\lambda$، دورهٔ نوسان حرکت می‌باشد.

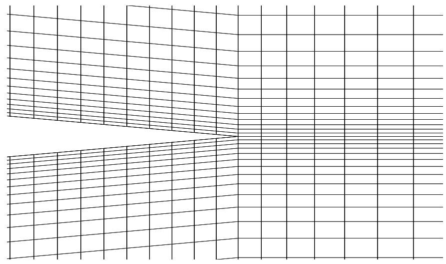



شکل ۹  ضریب پسای بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰ و دمای سطح بالوارهٔ ٤۰۰ کلوین

در شــکل‌هــای (۱۰ و ۱۱) ســاختار شــبکه‌بنــدی اطـراف بـالواره نشـان داده شـده‌اسـت. مناسـب بـودن شبکه‌های ریز اطراف بالواره به‌وضوح در این شـکل‌هـا دیده می‌شود.



شکل ۱۰  شبکه‌بندی در لبهٔ جلویی بالواره



شکل ۱۱  شبکه‌بندی در لبهٔ انتهایی بالواره

## شرایط مرزی

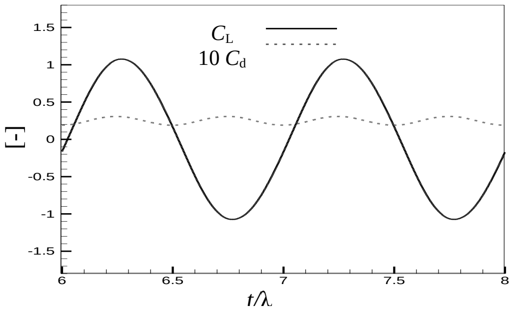
برروی بـالواره شـرط عـدم لغـزش (No Slip) از نـوع سرعت دیوارهٔ متحرک (Moving wall velocity) بـرای سرعت، شرط گرادیان صفر بـرای فشـار و شـرط دمـا ثابت برای دما به‌کار بـرده شـده‌اسـت. در مـرز ورودی سرعت جریان آزاد به‌عنوان شرط مرزی فیزیکی اعمـال و فشار با گرادیان صفر محاسبه می‌شود، به‌عبارت دیگر فشـار بـه‌عنـوان شـرط مـرزی عـددی از درون ناحیـهٔ محاسباتی برون‌یابی می‌شـود. در مـرز خروجـی، بـرای فشار از شرط مرزی فشار ثابت محیط و برای سـرعت، گرادیان صفر انتخاب می‌شود که سرعت از درون ناحیهٔ محاسباتی برون‌یابی می‌شود. در مرزهای بالا و پایین از شرط مرزی لغزشی (Slip) استفاده شده‌است.

## نتایج

در این قسمت، نتـایج اثـر انتقـال حـرارت بـرروی دو بالوارهٔ متقارن و انحنادار در حالت نوسـانی بـا حرکـت فراز و فرود در محدودهٔ اعداد رینولدز جریـان لایـه‌ای، برروی ضرایب برآ و پسای بالواره‌ها ارائه می‌شود.

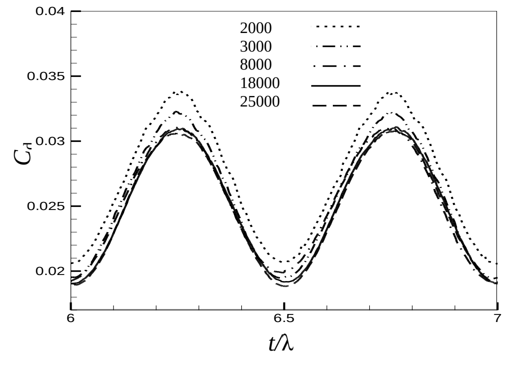
نکته‌ای که قبل از بررسی نتایج بایـد بـه آن توجـه نمود این است کـه، از آن‌جـا کـه شـروع حـل در ایـن شبیه‌سازی از حالت سکون است، بنابراین در نوسـانات ابتدایی نتایج به‌دست‌آمده برای ضـرایب آیرودینـامیکی به حالت شبه‌پایای خود نمی‌رسند و داده‌برداری بعد از گذشت چند دوره نوسان کامـل بایـد صـورت پـذیرد. به‌منظور محاسبهٔ تعداد دورهٔ لازم برای رسیدن بـه یـک حرکت نوسانی منظم (تکرارشونده)، ابتدا شرایط مسئلهٔ دنیس اف هینز و همکارانش [9] برای حرکت نوسـانی فراز و فـرود بـالوارهٔ ناکـا ۰۰۱۲ یعنـی عـدد رینولـدز ۲۰۰۰۰، عـدد مـاخ تقریبـاً برابـر بـا ۰/۰۰۱، فرکـانس کاهیدهٔ ۳/۹۳، دامنـهٔ نوسـان بـی‌بعـد ۰/۰۱۲٥ و دمـای جریان آزاد برابر با ۳۰۰ کلوین درنظر گرفته می‌شـود و برای حالت گرمایشی دمای سطح بالواره برابـر بـا ۳٥۰ کلوین، مسئله شبیه‌سازی می‌شود. بـرای شـرایط کـاری فوق، در تحقیق اخیر از دورهٔ ٦ به بعد، حرکت نوسانی به حالت مـنظم خـود مـی‌رسـد. شـکل (۱۳) تغییـرات ضرایب برآ و پسای به‌دست‌آمده در ایـن شـرایط را در

دو دورهٔ (٦ و ٧) نشان می‌دهد.



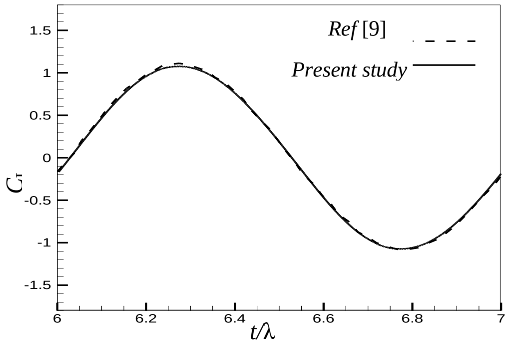

شکل ۱۲ هم‌گرایی دورهٔ نوسانی، بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳.۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰.۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین

بررسی اثر ریزکردن شبکهٔ محاسباتی در روش حجم محدود برای بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ و همان شرایط قبل صورت پذیرفته‌است. شبکه‌هایی با تعداد سلول محاسباتی در حدود ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۱۸۰۰۰، ۲۵۰۰۰ و ۳۷۰۰۰ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. شکل (۱۳) تغییرات ضریب پسا را در همان شرایط شکل (۱۲) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با ریزتر شدن شبکه از ۲۵۰۰۰ تا ۳۷۰۰۰ با وجود افزایش زیاد هزینهٔ محاسبات، نتیجهٔ محاسبات تغییر چشم‌گیری ندارد. بنابراین به‌منظور بررسی نتایج از شبکه‌هایی با تعداد سلول ۲۵۰۰۰ استفاده شده‌است.

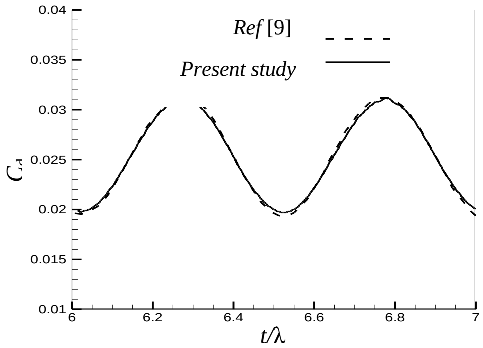



شکل ۱۳ استقلال از شبکه، بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵ دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین

برای بررسی صحت تحقیق اخیر در حالت نوسانی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج دنیس اف هینز و همکارانش [9] مورد مقایسه قرار گرفته‌است که در آن بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در شرایط جریان آزاد با عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، عدد ماخ تقریباً ۰/۰۰۱، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵ قرار دارد و دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین می‌باشد. شکل‌های (١٤ و ١٥) به‌ترتیب ضرایب برآ و پسای کار آنها را درمقایسه با نتایج تحقیق اخیر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها قابل‌مشاهده است، شبیه‌سازی اخیر دقت بسیار بالایی با نتایج کار دنیس اف هینز و همکارانش دارد که نشان‌دهندهٔ صحیح‌بودن تحقیق پیش‌رو است.




شکل ١٤ اعتبارسنجی منحنی ضریب برآ، بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰ کلوین

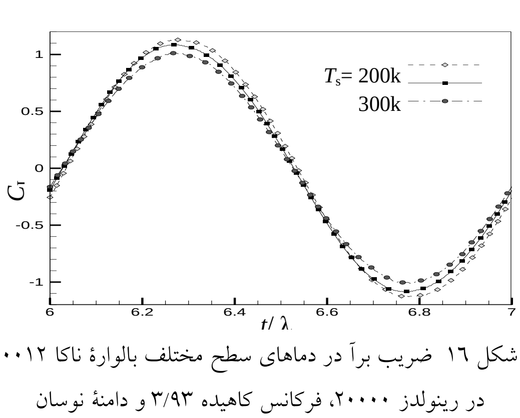



شکل ١٥ اعتبارسنجی منحنی ضریب پسا، بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵، دمای جریان آزاد ۳۰۰ و دمای سطح بالواره ۳۵۰

در این تحقیق ابتدا اثر انتقال حرارت را برروی بالوارهٔ نوسانی با حرکت فراز و فرود هم در حالت گرمایشی و هم در حالت سرمایشی بررسی خواهیم کرد. برای این منظور بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در همان شرایط قبلی و برای دمای جریان آزاد برابر با ۳۰۰ کلوین و دماهای سطح ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ٤۰۰ شبیه‌سازی شده‌است. شکل (١٦) ضرایب برآی لحظه‌ای را (به‌علت نزدیک‌بودن نمودارها و خوانابودن آن) فقط برای دماهای سطح ۲۰۰، ۳۰۰ و ٤۰۰ کلوین برای یک دورهٔ نوسان نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود سرمایش، ضریب برآی لحظه‌ای ماکزیمم را اندکی افزایش داده‌است، درحالی‌که گرمایش ضریب برآی ماکزیمم را اندکی کاهش داده‌است، که این نشان از اثر مثبت سرمایش دارد. همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود با افزایش دما تا ٤۰۰ کلوین ضریب برآی ماکزیمم، تقریباً ۷/۵ درصد کاهش و با کاهش دما به ۲۰۰ کلوین، ضریب برآی ماکزیمم تقریباً ۳/۸ درصد افزایش داشته‌است. ذکر این نکته مهم است که چون بالواره متقارن است ضریب برآی متوسط در تمام حالات صفر می‌باشد.

جدول ۱ مقادیر ضریب برآی بیشینه در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲

| | Ts=200 (K) | Ts=250 (K) | Ts=300 (K) | Ts=350 (K) | Ts=400 (K) |
|---|---|---|---|---|---|
| CL.M | ۱/۱۲۸٦ | ۱/۱۱۰٦ | ۱/۰۸۷۵ | ۱/۰٥٦۹ | ۱/۰۱۱٥ |



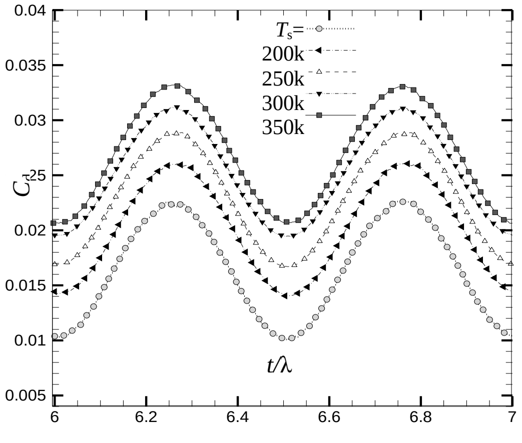

شکل ١٦ ضریب برآ در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲٥

با نگاه در شکل (١٦) این نکته نیز دیده می‌شود که شکل سینوسی منحنی ضریب برآ بر اثر سرمایش و گرمایش اندکی تغییر کرده‌است.

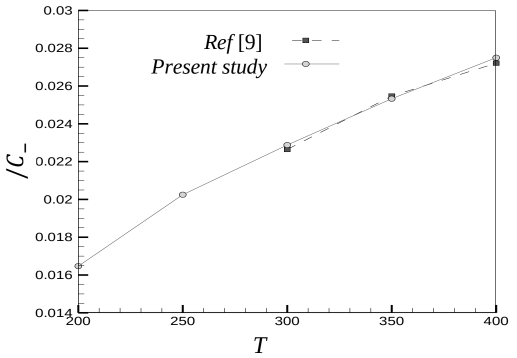
شکل‌های (۱۷ و ۱۸) به‌ترتیب ضرایب پسای لحظه‌ای و متوسط را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، اثر انتقال حرارت برروی ضریب پسا بسیار بیشتر از ضریب برآ بوده‌است. شکل (۱۷) نشان می‌دهد که ضریب پسای لحظه‌ای با افزایش دما افزایش و با کاهش دما کاهش می‌یابد. شکل (۱۸) نیز گویای اثر قابل‌ملاحظهٔ انتقال حرارت برروی ضریب پسای متوسط در حالت نوسانی می‌باشد. با افزایش ٥۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط ۱۰/۷ درصد و با افزایش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره، ضریب پسای متوسط تقریباً ۲۰/۲ درصد افزایش یافته‌است، این درحالی است که کاهش ٥۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط را ۱۲/۹۸ درصد کاهش و کاهش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره ضریب پسای متوسط را ۳۸/۹۱ درصد کاهش داده‌است. شکل‌های ضریب پسا، نشان می‌دهد که سرمایش اثر بیشتری برروی ضریب پسا نسبت‌به گرمایش داشته‌است. روند افزایشی و کاهشی ضریب پسای ناشی از انتقال حرارت در حالت نوسانی می‌تواند هم به‌خاطر افزایش و کاهش لزجت دینامیکی باشد و هم به الگوی گردابه‌ها در لبهٔ انتهایی مربوط باشد. به‌طور کلی پسا شامل دو جزء شناخته‌شدهٔ پسای فشاری و پسای لزجی می‌باشد. افزایش پسای لزجی با بالا رفتن دمای سطح و با تغییر در ویژگی‌های سیال در لایهٔ مرزی لزج متناسب است. برای سیالات نیوتنی، تنش مماسی لزج، متناسب با گرادیان سرعت نرمال به دیواره و لزجت دینامیکی می‌باشد. رابطهٔ زیر بیان یک‌بعدی این ارتباط را نشان می‌دهد:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial n} \qquad (۲٦)$$

هنگامی‌که لزجت دینامیکی $\mu$ با افزایش دما زیاد می‌شود، بدیهی است که تنش مماسی و ضریب پسا باید افزایش یابد. افزایش دما از ۳۰۰ تا ۴۰۰ کلوین، لزجت دینامیکی $\mu$ را تقریباً ۲۴/۶ درصد افزایش می‌دهد. کاهش دما از ۳۰۰ به ۲۰۰ کلوین منجر به کاهش ۲۸/۲ درصدی لزجت دینامیکی می‌شود [18]، برای همین اثر، تغییرات ضریب پسا در حالت سرمایشی می‌تواند بیشتر از گرمایشی باشد. همچنین شکل‌های ضریب پسای لحظه‌ای و متوسط نیز نشان می‌دهد که با افزایش دمای سطح بالواره اثر انتقال حرارت برروی ضریب پسای لحظه‌ای و متوسط کاهش داشته‌است. این می‌تواند ناشی از این امر باشد که حالت گرمایشی لایهٔ مرزی را ناپایدار می‌کند [6] و چون بالواره در حالت نوسانی نیز می‌باشد، این ناپایداری افزایش می‌یابد و زمان ماند جریان برروی بالواره برای انتقال حرارت مناسب کاهش می‌یابد. درصورتی‌که در حالت سرمایشی، لایهٔ مرزی پایدارتر و انتقال حرارت به‌صورت مناسب‌تری صورت می‌گیرد.

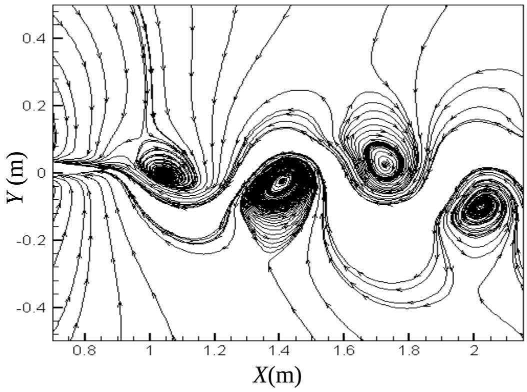



شکل ۱۷ ضریب پسا در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵

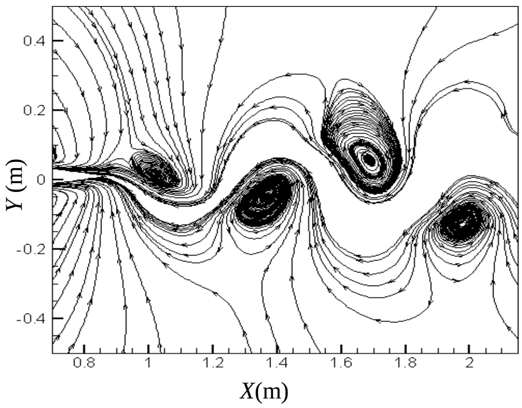



شکل ۱۸ مقادیر ضریب پسای متوسط در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵

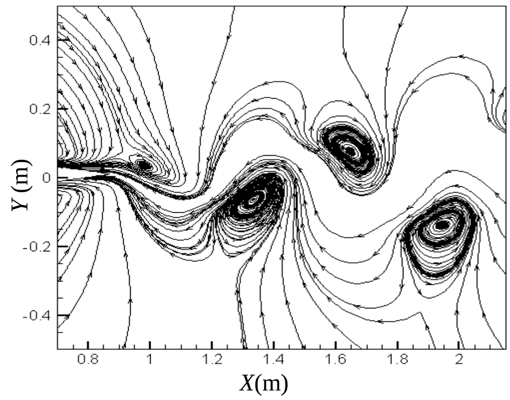
برای نمایش اثر انتقال حرارت بر الگوی گردابه‌ها در لبهٔ انتهایی، شکل‌های (۱۹، ۲۰ و ۲۱) الگوی گردابه‌ها را در یک زمان خاص ($t/\lambda$ =6.25) نشان می‌دهند. همان‌طور که در این سه شکل دیده می‌شود، گردابه‌های رهاشدهٔ پادساعتگرد از لبهٔ پایینی در همهٔ حالت‌ها پایین‌تر از گردابه‌های رهاشدهٔ ساعتگرد از لبهٔ بالایی می‌باشند. همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، این حالت برروی بالواره نیروی پسا تولید می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲۱) نیز دیده می‌شود، ضرایب پسای متوسط نیز در همهٔ حالت‌ها مثبت می‌باشد. همچنین فاصلهٔ عمودی بین مراکز گردابه‌ها با افزایش دمای سطح بالواره از ۲۰۰ به ۴۰۰ کلوین، بیشتر شده‌است که طبق گفتهٔ وون‌کارمن و برگز [1]، اگر فاصلهٔ عمودی بین ردیف‌ها افزایش یابد، ناحیهٔ سرعت متوسط کمتر (در حالت پسا) و یا ناحیهٔ سرعت متوسط بالاتر (در حالت رانش) افزایش می‌یابد که خود منجر به افزایش نیروی پسا می‌شود. همچنین با افزایش دمای سطح بالواره، جدایش گردابه از لبهٔ انتهایی بالواره به تأخیر افتاده‌است که وجود این گردابه برروی انتهای بالواره خود باعث تولید پسای بیشتر خواهد شد.




شکل ۱۹ گردابه‌های لبهٔ انتهایی بالواره در $t/\lambda = 6.25$ و $k=3.93$، دمای سطح بالواره برابر ۲۰۰ کلوین

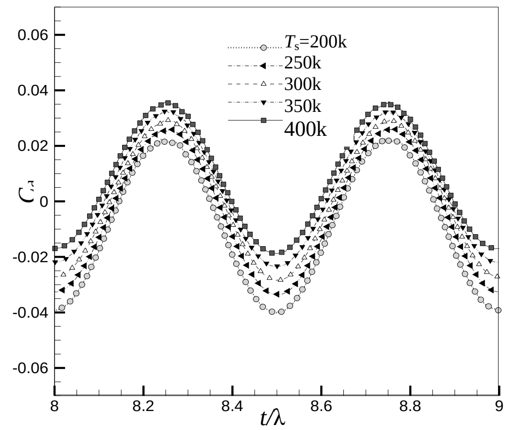



شکل ۲۰ گردابه‌های لبهٔ انتهایی بالواره در $t/\lambda=6.25$، دمای سطح بالواره برابر ۳۰۰ کلوین

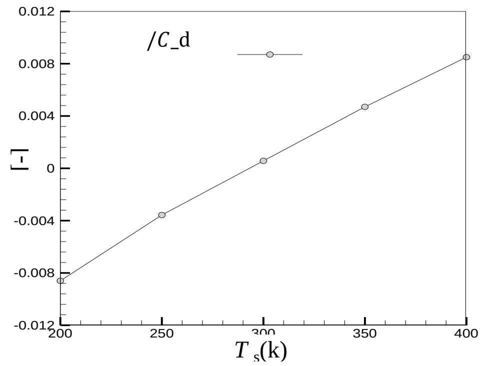



شکل ۲۱ گردابه‌های لبهٔ انتهایی بالواره در $t/\lambda = 6.25$، دمای سطح بالواره برابر ۴۰۰ کلوین

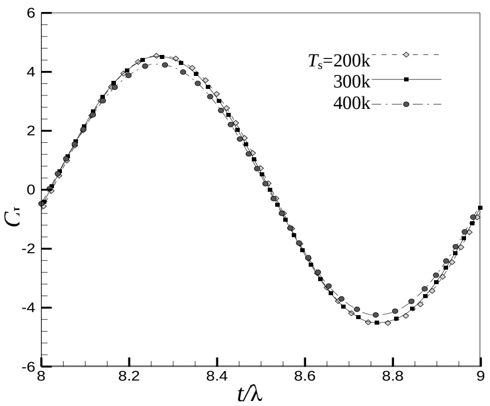
نکتهٔ دیگری که از اثر انتقال حرارت برروی ضریب پسا در حالت نوسانی می‌شود فهمید این است که اگر بالواره در فرکانس و دامنهٔ معینی در حالت بدون انتقال حرارت، تقریباً پسا یا رانش صفر تولید کند (حالت خنثای ذکرشده در مقدمه)، می‌توان با انتقال حرارت، آن را به حالت پسازا یا رانش‌زا تبدیل کرد. برای بیان این مطلب، همان شرایط قبلی را به بالواره اعمال می‌کنیم و فقط فرکانس کاهیده را به دو برابر ($K = 7.86$) افزایش می‌دهیم. شکل‌های (۲۲ و ۲۳) به‌ترتیب ضریب پسای لحظه‌ای و متوسط را برای دماهای مختلف در این حالت نشان می‌دهند. شکل (۲۳) نشان می‌دهد که در حالت بدون انتقال حرارت (حالتی که دمای سطح بالواره برابر با دمای جریان آزاد یعنی ۳۰۰ کلوین است.) ضریب پسا تقریباً برابر با صفر است که نشان‌دهندهٔ حالت تقریباً خنثای بالواره در این فرکانس از نوسان می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رود، گرمایش باعث افزایش ضریب پسا می‌شود که منجر به تولید پسا می‌گردد و کاهش دما منجر به تولید پسای منفی یا به‌عبارتی تولید رانش می‌شود. البته چون فرکانس دو برابر شده طبق استدلال قبلی، زمان لازم برای انتقال حرارت مناسب بین بالواره و جریان اطراف به حداقل رسیده و اثر انتقال حرارت در هر دو حالت گرمایشی و سرمایشی تقریباً مشابه بوده و نمودار ضریب پسای متوسط تقریباً خطی شده‌است. تأثیر انتقال حرارت همان‌طور که از نمودارها برمی‌آید در فرکانس بالاتر نسبت‌به فرکانس پایین‌تر کمتر بوده‌است. شکل (۲٤) که نمودار ضریب برآی لحظه‌ای را نشان می‌دهد نیز با همین استدلال قابل بیان است. به‌عبارتی در فرکانس کاهیدهٔ پایین‌تر ($K = 3.93$)، ضریب برآی لحظه‌ای ماکزیمم از ۲۰۰ تا ٤۰۰ درجه تقریباً ۱۰/۵ درصد کاهش داشته‌است، حال آن‌که این کاهش برای فرکانس بالاتر ($K = 7.86$)، تقریباً ٦/۵ درصد بوده‌است.




شکل ۲۲ ضریب پسا در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰,۰۰۰، فرکانس کاهیده ۷/۸۶ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵

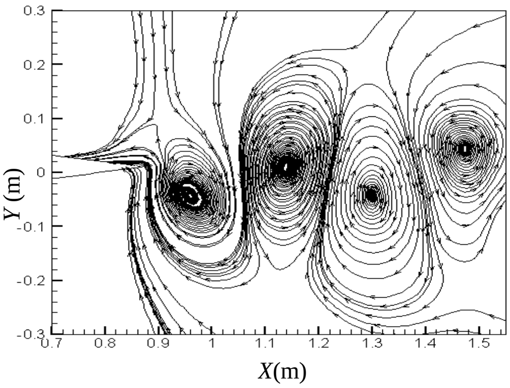



شکل ۲۳ مقادیر ضریب پسای متوسط در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰,۰۰۰، فرکانس کاهیده ۷/۸۶ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵

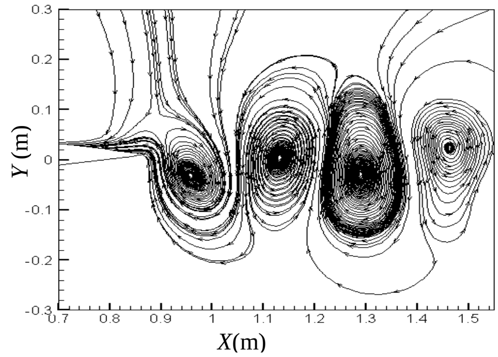



شکل ۲۴ ضریب برآ در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۷/۸۶ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵

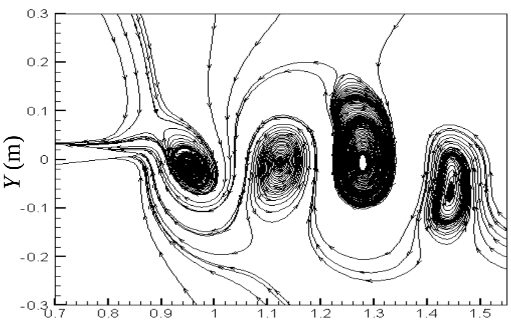
نکتهٔ دیگر این‌که همان‌طور که انتظار می‌رفت افزایش فرکانس ضریب برآ را به‌مقدار قابل‌توجهی افزایش داده‌است. همان‌طور که در شکل (۲۳) دیده می‌شود، ضریب پسای متوسط در حالت بدون انتقال حرارت، تقریباً صفر، در حالت‌های گرمایشی، مقدار ضریب پسا مثبت و در حالت‌های سرمایشی پسا منفی شده‌است. به‌عبارتی طبق نکات ذکرشده در مقدمه، درمورد گردابه‌ها توقع داریم که در حالت بدون انتقال حرارت گردابه‌ها تقریباً خنثی، در حالت گرمایشی از نوع پسازا و در حالت سرمایشی از نوع رانش‌زا باشند. البته چون مقادیر ضریب پسا بسیار کوچک است انتظار می‌رود که این تفاوت زیاد محسوس نباشد. برای بررسی این موضوع الگوی گردابه‌ها در لبهٔ انتهایی برای سه حالت ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ کلوین بررسی می‌شود. شکل‌های (۲۵، ۲٦ و۲۷) الگوی گردابه‌ها را برای این سه حالت در یک زمان خاص (مثلاً $t/\lambda = 6.25$) نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در دمای ۳۰۰ کلوین گردابه‌ها در یک راستا قرار دارند و از نوع خنثی می‌باشند. این درحالی است که در دمای ۲۰۰ درجه، گردابهٔ رهاشده از پایین که پادساعتگرد است، اندکی بالاتر از گردابهٔ ساعتگرد جداشده از لبهٔ بالایی قرار دارد که در این حالت گردابه از نوع رانش‌زا می‌باشد. در دمای ٤۰۰ درجه نیز گردابهٔ ساعتگرد جداشده از لبهٔ بالایی، اندکی بالاتر از گردابهٔ پادساعتگرد جداشده از لبهٔ پایینی می‌باشد، که طبق بحث‌های مطرح‌شده در مقدمه، این نوع آرایش برای گردابه‌ها از نوع پسازا می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد به‌دلیل کوچکی ضرایب پسای متوسط این تفاوت‌ها اندک هستند ولی به هر حال قابل‌مشاهده می‌باشند.




شکل ۲۵ گردابه‌های لبهٔ انتهایی بالواره در $t/\lambda=6.25$ و $k=7.86$، دمای سطح بالواره برابر ۲۰۰ کلوین

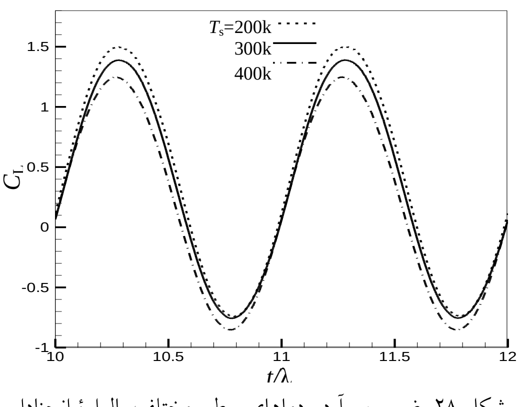



شکل ۲۶ گردابه‌های لبهٔ انتهایی بالواره در $t/\lambda=6.25$ و $k=7.86$، دمای سطح بالواره برابر ۳۰۰ کلوین

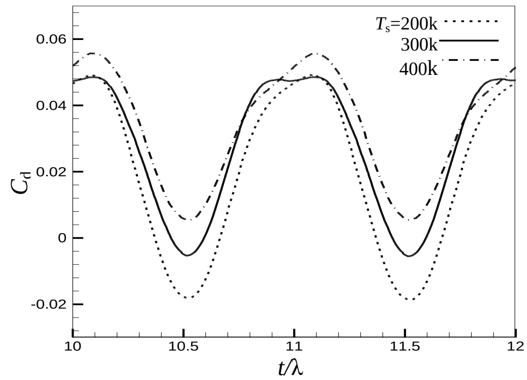



شکل ۲۷ گردابه‌های برروی بالواره در $t/\lambda=6.25$ و $k=7.86$، دمای سطح بالواره برابر ۴۰۰ کلوین

برای مطالعهٔ اثر انتقال حرارت برروی ضریب برآ بهتر است بالوارهٔ انحناداری درنظر گرفته‌شود و در حالت سرمایشی و گرمایشی قرار داده شود. برای این کار در تحقیق اخیر از بالوارهٔ ناکا ۴۴۱۲ استفاده شده‌است. شکل‌های (۲۸ و ۲۹) ضرایب برآ و پسای لحظه‌ای را در دو دورهٔ متوالی (به‌علت نمایش هم‌گرایی این بالواره) نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود حالت سرمایشی اثر مثبتی بر عملکرد آیرودینامیکی بالواره داشته‌است به این معنی که ضریب برآی لحظه‌ای را افزایش و ضریب پسای لحظه‌ای را کاهش داده‌است، ولی گرمایش سطح بالواره با کاهش ضریب برآی لحظه‌ای و افزایش ضریب پسای لحظه‌ای، اثری منفی بر عملکرد بالواره داشته‌است. جدول (۲) این مطلب را به‌طور واضح نشان می‌دهد. به‌عبارتی با سرمایش سطح بالواره ضریب برآی متوسط افزایش قابل‌توجهی داشته و ضریب پسای متوسط نیز کاهش یافته‌است به‌گونه‌ای که نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط در حالت سرمایشی نسبت‌به حالت بدون انتقال حرارت ۸۷/۸ درصد افزایش یافته‌است، ولی گرمایش ضریب برآی متوسط را کاهش و ضریب پسای متوسط را افزایش داده‌است به‌طوری‌که نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط نسبت‌به حالت بدون انتقال حرارت ۹۱ درصد کاهش یافته‌است. این نشان‌دهندهٔ اثر مثبت سرمایش سطح بالواره و اثر منفی گرمایش سطح بالواره در عملکرد آیرودینامیکی بالوارهٔ انحنادار می‌باشد. نکتهٔ دیگر این‌که طبق گفتهٔ گوئرو [5]، انحنا اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر ضریب برآ داشته ولی ضریب پسا را زیاد تغییر نداده‌است.




شکل ۲۸ ضریب برآ در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ انحنادار ناکا ۴۴۱۲ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵




شکل ۲۹ ضریب پسا در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ انحنادار ناکا ٤٤١٢ در رینولدز ۲۰۰۰۰، فرکانس کاهیده ۳/۹۳ و دامنهٔ نوسان بی‌بعد ۰/۰۱۲۵

جدول ۲ مقادیر ضریب برآ و پسای متوسط و نسبت آنها در دماهای سطح مختلف بالوارهٔ ناکا ٤٤١٢

| | $\overline{C_d}$ | $\overline{C_L}$ | $\overline{C_L}/\overline{C_d}$ |
|---|---|---|---|
| $T_s$=200K | ۰/۰۱۸ | ۰/٤۰۷ | ۲۲/٦۱ |
| $T_s$=300K | ۰/۰۲۷ | ۰/۳۲۵ | ۱۲/۰۳۷ |
| $T_s$=400K | ۰/۰۳۳ | ۰/۲۰۸ | ٦/۳ |

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر انتقال حرارت برروی عملکرد بالواره‌های نوسانی با حرکت فراز و فرود، توسط یک روش عددی برمبنای حجم محدود بررسی شده‌است. جریان آرام با عدد رینولدز ۲۰۰۰۰، لزج، قابل‌تراکم و ناپایا درنظر گرفته‌شده و با درنظرگرفتن تغییر مشخصات سیال با دما، مقدار لزجت دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی سیال به‌ترتیب با روابط ساترلند و اوکن ارزیابی شده‌است. نکات اصلی نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱- درمورد بالوارهٔ متقارن ناکا ۰۰۱۲، دمای پایین‌تر بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد (حالت سرمایشی)، منجر به بهبود عملکرد بالواره شده‌است و دمای بالاتر سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد (حالت گرمایشی)، اثر منفی بر عملکرد بالواره داشته‌است. به‌عنوان مثال برای بالوارهٔ ناکا ۰۰۱۲ با افزایش ۵۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط ۱۰/۷ درصد و با افزایش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره، ضریب پسای متوسط تقریباً ۲۰/۲ درصد افزایش یافته‌است، این درحالی است که کاهش ۵۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد، ضریب پسای متوسط را ۱۲/۹۸ درصد کاهش داده و کاهش ۱۰۰ درجه‌ای دمای سطح بالواره ضریب پسای متوسط را ۳۸/۹۱ درصد کاهش داده‌است. روند افزایشی و کاهشی ضریب پسای ناشی از انتقال حرارت در حالت نوسانی می‌تواند هم به‌خاطر افزایش و کاهش لزجت دینامیکی باشد و هم به الگوی گردابه‌ها در لبهٔ انتهایی مربوط باشد. با کاهش دما لزجت دینامیکی کاهش می‌یابد که باعث کاهش پسای اصطکاکی می‌شود. همچنین کاهش دما فاصلهٔ عمودی بین گردابه‌های پشت بالواره را کاهش می‌دهد که این نیز از طریق کاهش پسای فشاری، پسای کل را کاهش داده‌است. عکس آن برای حالت گرمایشی صادق است. همچنین کاهش دمای سطح بالواره باعث اندکی اختلاف فاز در منحنی‌های ضریب برآ مخصوصاً در نقاط بیشینه و کمینه شده‌است.

۲- در فرکانس پایین (k=3.93)، الگوی گردابه‌ها در حالت‌های مختلف حرارتی از نوع پسازا می‌باشد و با افزایش فرکانس (k=7.86)، انتقال حرارت الگوی متفاوتی از گردابه‌ها را در پشت بالواره ایجاد کرده‌است، به‌گونه‌ای که در حالت بدون انتقال حرارت برای بالوارهٔ متقارن، گردابه‌ها تقریباً از نوع خنثی، در حالت سرمایشی بالواره، گردابه‌ها از نوع رانش‌زا و در حالت گرمایشی بالواره، گردابه‌ها از نوع پسازا بوده‌اند.

۳- درمورد بالوارهٔ انحنادار ناکا ٤٤١٢، انتقال حرارت برروی بالواره علاوه‌بر تأثیر بر ضرایب پسای لحظه‌ای و متوسط و ضرایب برآی لحظه‌ای، اثر قابل‌توجهی بر ضریب برآی متوسط گذاشته‌است به‌گونه‌ای که نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط در حالت

سرمایشی درمقایسه با حالت بدون انتقال حرارت ۸۷/۸ درصد افزایش و نسبت ضریب برآی متوسط به ضریب پسای متوسط در حالت گرمایشی نیز درمقایسه با حالت بدون انتقال حرارت، ۹۱ درصد کاهش یافته‌است.

٤- در این تحقیق دمای پایین‌تر سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد (حالت سرمایشی)، باعث بهبود عملکرد بالواره‌ها و دمای بالاتر سطح بالواره نسبت‌به دمای جریان آزاد (حالت گرمایشی)، اثری منفی در عملکرد آیرودینامیکی آنها داشته‌است.

## مراجع


1. Von Karman, T., Burgers J. and General, M., "*Aerodynamic Theory, A General Review of Progress*", edited by *W.F.* Durand, Vol. 2, Springer, Berlin, (1935).
2. Young, J., "Numerical Simulation of the Unsteady Aerodynamics of Flapping Airfoils", Ph.D Thesis, The University of New South Wales Australian Defence Force Academy, (2005).
3. Lai, J.C.S. and Platzer, M.F., "Jet Characteristics of a Plunging Airfoil", *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 12, pp. 1529-1537, (1999).
4. Jones, K.D., Dohring, C.M. and Platzer M.F., "Experimental and ComputationalInvestigation of the Knoller-Betz Effect", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 7, pp. 1240-1246, (1998).
5. Guerrero, J.E., "Effect of Cambering on the Aerodynamic Performance of Heaving Airfoils", *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 398–407, (2009).
6. Norton, D.J., Macha J.M. and Young J.C., "Surface Temperature Effect on Subsonic Stall", *Journal of Spacecraft and Rockets* 10, pp. 581-587, (1973).
7. Kim, J., Rusak, Z. and Koratkar, N., "Small-scale Airfoil Aerodynamic Efficiency Improvement by Surface Temperature and Heat Transfer", *AIAA Journal* 41, pp. 2105-2113, (2003).
8. Bekka N., Bessaı R. and Sellam h, M., "Numerical Study of Heat Transfer around the Small Scale Airfoil Using Various Turbulence Models", *Numerical Heat Transfer Part A: Applications* 56, pp. 946-969, (2009).
9. Hinz, D.F., Alighanbarin, H. and Breitsamter, C., "Influence of Heat Transfer on the Aerodynamic Performance of a Plunging and Pitching NACA0012 Airfoil at Low Reynolds Numbers", *Journal of Fluids and Structures* 37, pp. 88-99, (2013).
10. Open CFD Limited, 2008a. Open FOAM—The Open Source CFD Toolbox User Guide, version 2.3.
11. Open CFD Limited, 2008b. Open FOAM—The Open Source CFD Toolbox Programmer's Guide, version 2.3.
12. Gnoffo, P. and Vectorized, A, "Finite-volume, Adaptive Grid Algorithm Applied to Planetary Entry Problems", *AIAA journal*, Vol. 21, No. 9 ,pp. 1249-1254, (1983).
13. Nakahashi, K. and Deiwert, G.S., "Three-dimensional Adaptive Grid Method", *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 948–954, (1986).
14. Baghri A., Djavareshkian M. H., Esmaieli A. and Zamanifard A.M., "Aerodynamic Investigation and Optimization of Airfoil Geometry and Oscillation Parameters in the Plunging Motion Using RSM", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No 16, pp. 101-111, (2012)
15. Zamanifard, A.M., "Plunging Motionsimulation of an Oscilating Airfoils with Dynamic Mesh", MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, (2012).
16. Ferziger, J.H. and Peric M., "Computational Method for Fluid Dynamics", Springer London, (2002).

17. Versteeg, H.K., "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Valume Method*", 2/E: Pearson, February 16, (2007).
18. Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., *"Introduction to Heat Transfer"*, Fourth Edittion, New York: Wiley, (2001).
19. Sutherland, W., "The Viscosity of Gases and Molecular Force", *Philosophical Magazine 5*, Vol. 13, pp. 507-531, (1893).
20. Eucken, A., "*Allgemeine Gesetzmäßigkeiten für das Wärmeleitvermögen verschiedener Stoffarten und Aggregatzustände*", Fourth Edittion, New York: Wiley, (1940).